



①⑨ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

①⑫ **Offenlegungsschrift**  
①⑩ **DE 101 62 379 A 1**

⑤① Int. Cl. 7:  
**B 23 K 26/38**

②⑦ Aktenzeichen: 101 62 379.8  
②② Anmeldetag: 19. 12. 2001  
④③ Offenlegungstag: 17. 7. 2003

(3)

DE 101 62 379 A 1

⑦① Anmelder:  
Wetzel GmbH, 79639 Grenzach-Wyhlen, DE

⑦② Erfinder:  
Granse, Gerolf, 79689 Maulburg, DE

⑤⑥ Entgegenhaltungen:

DE 199 05 571 C1  
DE 100 54 853 A1  
DE 40 21 407 A1  
US 52 23 692 A  
US 44 61 947  
US 41 69 976

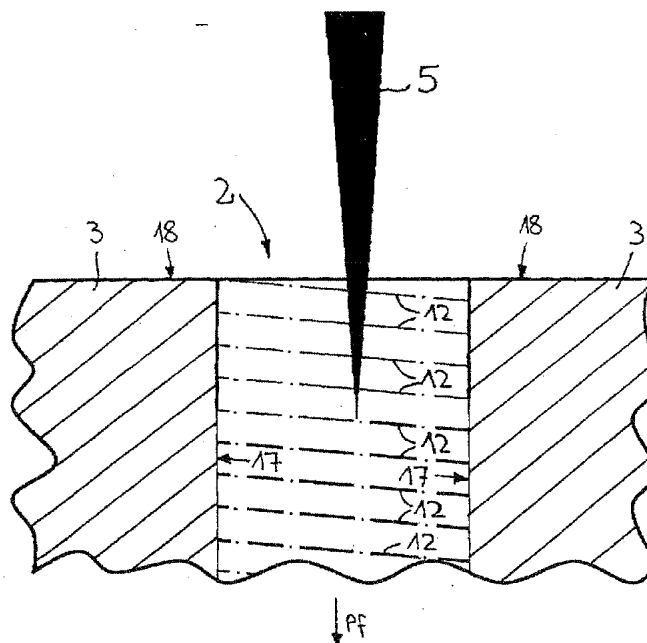
DAUSINGER, F., [u.a.]: Bohren keramischer  
Werkstoffe  
mit Kurzpuls-Festkörperlasern. In: LaserOpto, 1999  
, H. 3, S. 78-85;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Verfahren zum Herstellen einer Mikrobohrung

⑤⑦ Bei einem Verfahren zum Herstellen einer Mikrobohrung wird ein Laserstrahl im Bereich eines Werkstücks fokussiert. Zum Abtragen von innerhalb einer zu erzeugenden Bohrlochkontur befindlichem Werkstückmaterial werden der Fokuspunkt relativ zueinander bewegt. Dabei läuft der Fokuspunkt innerhalb der Bohrlochkontur oder deren gerader Verlängerung um, wobei er zusätzlich in und/oder entgegen der Durchtrittsrichtung der zu erzeugenden Mikrobohrung relativ zu dem Werkstück bewegt wird.



DE 101 62 379 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen einer Mikrobohrung, wobei ein Laserstrahl im Bereich eines Werkstücks fokussiert und der Fokuspunkt zum Abtragen von innerhalb einer zu erzeugenden Bohrlochkontur oder deren gerader Verlängerung umlaufend bewegt wird.

[0002] Ein derartiges Verfahren ist aus US 6 057 525 bekannt. Dabei wird ein Laserstrahl über einen in zwei quer zueinander verlaufenden Richtungen verschwenkbaren X-Y-Ablenkspiegel geleitet und anschließend mittels einer Fokussierlinse fokussiert. Zum Erzeugen einer kreisförmigen Umlaufbewegung des Fokuspunkts werden die Antriebe für die X- und Y-Achse des Ablenkspiegels mit zwei um 90° phasenverschobenen sinusförmigen Steuersignalen angesteuert. Mittels einer Positioniereinrichtung wird der Fokuspunkt zum Abtragen von innerhalb der zu erzeugenden Bohrlochkontur befindlichem Werkstückmaterial vor Beginn des Materialabtrags im Bereich des Werkstücks positioniert, wobei die Fokuslage sowohl in Abhängigkeit von dem Material des Werkstücks als auch in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung gewählt wird.

[0003] Um an den Stirnseiten des Bohrlochs im Bereich der Bohrlochränder Kondensat und dergleichen Ablagerungen zu vermeiden ist sowohl die dem Laserstrahl zugewandte Vorderseite auch die gegenüberliegende Rückseite des Werkstücks jeweils während der Materialbearbeitung mit einer Abdeckplatte abgedeckt. Die Abdeckplatten werden mittels einer Halterung in ihrer Lage relativ zu dem Werkstück fixiert. Während des Materialabtrags kondensiert der an der Bearbeitungsstelle des Werkstücks verdampfende Werkstoff und schlägt sich auf den Abdeckplatten nieder. Nach Fertigstellung des Bohrlochs werden die Abdeckplatten entfernt. Das Verfahren ermöglicht zwar die Herstellung von Mikrobohrungen, die an ihren Stirnseiten weitgehend frei von Bearbeitungsrückständen sind, jedoch ist das Verfahren noch relativ aufwendig. Vor allem bei Werkstücken die an ihrer Vorder- und/oder Rückseite einen von einer Ebene abweichenden Verlauf aufweisen oder bei denen die Stelle, an der die Mikrobohrung in der das Werkstück eingebracht werden soll, nur schlecht zugänglich ist, ist das Abdecken des Werkstücks mit den Abdeckplatten schwierig und umständlich. Ungünstig ist außerdem, dass die mit dem vorbekannten Verfahren hergestellten Bohrlochern nur eine relativ geringe Qualität aufweisen, insbesondere weil die Abmessungen der Mikrobohrung von den gewünschten Abmessungen abweichen können.

[0004] Es besteht deshalb die Aufgabe, ein Verfahren der eingangs genannten Art zu schaffen, dass auf einfache Weise die Herstellung von Mikrobohrungen mit hoher Maßgenauigkeit und Qualität ermöglicht.

[0005] Diese Aufgabe wird bei einem Verfahren der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass der Fokuspunkt und das Werkstück während des Materialabtrags zusätzlich zu der Umlaufbewegung in und/oder entgegen der Durchtrittsrichtung der zu erzeugenden Mikrobohrung relativ zueinander bewegt werden.

[0006] Der Fokuspunkt wird also während der Materialbearbeitung außer in Umfangsrichtung auch noch in Längs- oder Z-Richtung der Mikrobohrung und somit dreidimensional relativ zu dem Werkstück positioniert. Dabei erfolgt diese dreidimensionale Positionierung des Fokuspunkts bei tiefen Mikrobohrungen vorzugsweise nur über einen Teil der Länge bzw. Tiefe der Mikrobohrung. So kann beispielsweise bei einer Mikrobohrung mit einer Tiefe von etwa einem Millimeter die Verstellung der Z-Lage des Fokus etwa 350 bis 500 Mikrometer betragen. Vor allem bei Werkstücken mit geringer Dicke kann die dreidimensionale Positio-

nierung des Fokuspunkts aber auch über die gesamte Länge der herzustellenden Mikrobohrung erfolgen. In vorteilhafter Weise wird dadurch im Bereich der stirnseitigen Ränder der Mikrobohrung jeweils eine hohe Oberflächenqualität des Werkstücks ermöglicht, wobei die Umgrenzungsänder der Mikrobohrung weitgehend frei von Kondensat und dergleichen Rückständen bleiben. Die Bohrungsinnenwand weist nur eine sehr geringe rissarme bis rissfreie Schmelzphase auf. Das Verfahren ermöglicht somit die Herstellung von Mikrobohrungen mit hoher Qualität und Maßgenauigkeit, insbesondere im Bohrungsein- und austrittsbereich. Somit kann der Aufwand für eine Nachbearbeitung der Mikrobohrung wesentlich reduziert oder sogar eingespart werden. Das Verfahren ist vor allem zur Herstellung von Mikrobohrungen mit Querschnittsabmessungen von 80 mit 300 Mikrometern mit nahezu beliebigen Querschnitt, also zum Beispiel mit Rund- oder Freiformquerschnitt, in Stählen oder dergleichen Metallen sowie in Keramiken, wie zum Beispiel  $Al_2O_3$ , geeignet. Das Verfahren wird bevorzugt zur Herstellung von durchflussbestimmenden Durchgangsbohrungen, wie zum Beispiel Spinddüsenbohrungen verwendet. Das Verfahren ist nicht auf bestimmte Materialien oder Laser bzw. Laserparameter, wie z. B. Wellenlänge, Pulsdauer, Strahlenergie und/oder Repetitionsrate beschränkt.

[0007] Bei einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung wird der Fokuspunkt während des Materialabtrags entlang einer schraubenlinienförmigen Bahnkurve bewegt. Das Verfahren ist dann besonders einfach durchführbar.

[0008] Bei einer Ausführungsform der Erfindung wird die in Durchtrittsrichtung der zu erzeugenden Mikrobohrung weisende Geschwindigkeitskomponente der Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt und Werkstück zumindest in einem Abschnitt der zu erzeugenden Mikrobohrung konstant gehalten. In einen homogenen Werkstoffs ergibt sich dann eine gleichmäßige Oberflächenqualität der Innenwand der Mikrobohrung.

[0009] Bei einer anderen Ausführungsform der Erfindung wird die in Durchtrittsrichtung der zu erzeugenden Mikrobohrung weisende Geschwindigkeitskomponente der Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt und Werkstück in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt verändert, und insbesondere in einem Anfangs- und/oder Endabschnitt der zu erzeugenden Mikrobohrung kleiner gewählt als in einem dazwischen befindlichen Abschnitt der Mikrobohrung. Dadurch kann am Anfang der Mikrobohrung, wenn der Laserstrahl auf eine noch unbearbeitete, einen relativ hohen Reflexionsgrad aufweisende Werkstückoberfläche auftrifft, durch die dort reduzierte Bahngeschwindigkeit des Fokuspunkts eine größere Leistung in das Werkstück eingekoppelt werden, um die dann noch erhöhten Abstrahlverluste auszugleichen. Durch Reduzierung der Bahngeschwindigkeit am Ende der Mikrobohrung können die bei Durchtritt des Laserstrahls durch den bereits fertiggestellten Abschnitt der Bohrung und der sich darin ausbildenden Dampfkapillare auftretenden Verluste im Laserstrahl ausgeglichen werden.

[0010] Bei einer besonders vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass der Durchmesser oder wenigstens eine Querschnittsabmessung der Umlaufbewegung des Fokuspunkts in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt verändert wird und dass vorzugsweise in einem Anfangsabschnitt der Mikrobohrung der Durchmesser oder die wenigstens eine Querschnittsabmessung kleiner gewählt wird als in einem sich an den Anfangsabschnitt anschließenden Abschnitt der Mikrobohrung. Dadurch kann an der strahleinfallsseitigen Stirnseite der Mikrobohrung die Gefahr der Ablagerung von Rückständen zusätzlich reduziert werden, wodurch eine noch bessere Maßgenauigkeit und somit eine entsprechend hohe Qualität der Mikrobohrung erreicht

wird.

**[0011]** Die Herstellung einer Mikroböhrung, die wenigstens einen trichter- oder konusförmig sich in Strahlausbreitungsrichtung verjüngenden Böhrlochabschnitt aufweist, kann dadurch erreicht werden, dass der Durchmesser oder wenigstens eine Querschnittsabmessung der Umlaufbewegung des Fokuspunkts in einem vorzugsweise am Anfang der zu erzeugenden Mikroböhrung angeordneten Böhrlochabschnitt mit zunehmendem Böhrfortschritt reduziert wird, vorzugsweise derart, dass die Bahnkurve entlang welcher der Fokuspunkt bewegt wird, in einer trichter- oder konusförmigen Fläche verläuft. Dabei kann ein solcher trichter- oder konusförmiger Böhrlochabschnitt auch einen von einer Kreisform abweichenden, nahezu beliebigen Querschnitt aufweisen. Gegebenenfalls ist es sogar möglich, dass sich der trichter- oder konusförmige Wandungsabschnitt in Umfangsrichtung nur über einen Teil der Wandung der Böhrung erstreckt.

**[0012]** Bei einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass die zu erzeugende Kontur der Mikroböhrung im wesentlichen in einem Schrapp-Bearbeitungsschritt hergestellt wird, das danach in einem Schlicht-Bearbeitungsschritt die Wandung der Mikroböhrung geglättet wird, und das in dem Schlicht-Bearbeitungsschritt die Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt und Werkstück vorzugsweise größer gewählt wird als in dem Schrapp-Bearbeitungsschritt. Dabei ist die Relativgeschwindigkeit in dem Schlicht-Bearbeitungsschritt vorzugsweise fünf bis zehn Mal so hoch wie die Relativgeschwindigkeit in dem Schrapp-Bearbeitungsschritt. Dadurch kann trotz einer geringen Bearbeitungsdauer eine rissarme Böhrlochwand mit hoher Innenwand-Qualität erreicht werden.

**[0013]** Vorteilhaft ist, wenn in dem Schlicht-Bearbeitungsschritt der Drehsinn der Umlaufbewegung des Fokuspunkts entgegengesetzt zum Drehsinn der Umlaufbewegung bei dem Schrapp-Bearbeitungsschritt gewählt wird. Dadurch kann eine noch glattere Innenwand der Mikroböhrung erzeugt werden.

**[0014]** Bei einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass der Fokuspunkt zu Beginn der Bearbeitung innerhalb der zu erzeugenden Böhrlochkontur oder deren gerader Verlängerung mit seitlichem Abstand dazu vorzugsweise etwa mittig zu der zu erzeugenden Mikroböhrung positioniert wird, bis Material von dem Werkstück abgetragen wird, dass danach der seitliche Abstand zwischen der Böhrlochkontur oder deren gerader Verlängerung durch eine Relativbewegung zwischen Fokuspunkt und Werkstück reduziert wird und dass dann die zu erzeugende Böhrlochkontur im wesentlichen hergestellt wird. Durch diese Maßnahme wird an der Stirnseite der Mikroböhrung eine noch rückstandsfreiere Werkstückoberfläche erreicht. Außerdem wird die Wärmeeinkopplung in das Material der späteren Innenwand der Mikroböhrung und somit die Gefahr einer Rissbildung in der Innenwand reduziert.

**[0015]** Vorteilhaft ist, wenn der Laserstrahl zum Erzeugen der Umlaufbewegung des Fokuspunkts quer zu seiner Längserstreckung parallel verschoben wird und dabei vorzugsweise etwa rechtwinklig zur strahleinfallseitigen Oberfläche des Werkstücks auf dieses auftrifft. Ein rechtwinkliger Strahleinfall kann beispielsweise durch Verwendung einer telezentrischen Optik erreicht werden. Der Laserstrahl kann aber auch bei schrägem Auftreffen auf die strahleinfallseitige Oberfläche des Werkstücks quer zu seiner Längserstreckung parallel verschoben werden, beispielsweise bei Verwendung einer f- $\theta$ -Optik.

**[0016]** Zum Herstellen konturenscharfer Böhrlöcher mit von einer Kreisform abweichendem Querschnitt ist es vorteilhaft, wenn bei einer Schrappbearbeitung wenigstens

zwei seitlich aneinander angrenzende oder sich seitlich reichsweise überdeckende Teilböhrlöcher in das Werkstück eingebracht werden, und wenn dazu jeweils der Fokuspunkt innerhalb der Böhrlochkontur des zu betreffenden, zu erzeugenden Teilböhrlochs oder dessen gerader Verlängerung umlaufend und zusätzlich in und/oder entgegen der Durchtrittsrichtung des zu erzeugenden Teilböhrlochs relativ zueinander bewegt werden. Bei einem sich anschließenden Schlichtbearbeitungsschritt wird der Fokuspunkt dagegen vorzugsweise entlang der gesamten Kontur der zu erzeugenden Mikroböhrung bewegt.

**[0017]** Vorteilhaft ist, wenn die Strahlleistung des Laserstrahls in Abhängigkeit von dem Böhrfortschritt verändert wird und wenn vorzugsweise in einem Anfangs- und/oder Endabschnitt der zu erzeugenden Mikroböhrung eine größere Strahlleistung gewählt wird als in einem dazwischen befindlichen Abschnitt der Mikroböhrung. Auch dadurch können die zu Beginn des Böhrungsvorgangs an der noch unbearbeiteten Werkstückoberfläche auftretenden Abstrahlverluste sowie die beim Abtragen von Werkstückmaterial am Ende der Mikroböhrung in dieser auftretenden Streuverluste des Laserstrahls kompensiert werden.

**[0018]** Eine gute Energieeinkopplung in das abzutragende Böhrlochmaterial kann auch dadurch erreicht werden, dass der Laserstrahl im wesentlichen in einer Ebene polarisiert ist, und dass Lage dieser Polarisationssebene relativ zu dem Werkstück entlang der Bahnkurve des Fokuspunkts verändert wird, vorzugsweise derart, dass die Polarisationssebene jeweils etwa rechtwinklig zur Tangente an die Bahnkurve in der jeweiligen Bearbeitungsstelle verläuft. Bei einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung wird im Bereich der zu erzeugenden Mikroböhrung während des Materialabtrags von dem Werkstück ein Hilfsgasstrom vorzugsweise quer zur Durchtrittsöffnung der zu erzeugenden Mikroböhrung zugeführt. Dabei wird der Hilfsgasstrom bevorzugt parallel zur Werkstückoberfläche geführt, wobei der Hilfsgas-Volumenstrom kleiner als 5 Liter pro Minute bei sehr geringem Druck sein kann.

**[0019]** Die während des Materialabtrags auftretenden gas- bzw. plasmadynamischen Prozesse können dadurch zusätzlich unterstützt werden, dass an der der Strahleinkoppelseite gegenüberliegenden Rückseite des Werkstücks ein Unterdruck angelegt wird. Durch diese Maßnahme werden in der Mikroböhrung befindliche Gase oder Materie, die Strahlleistung absorbieren, zur Rückseite des Böhrlochs hin abgesaugt, wodurch eine gute Energieeinkopplung in den am Ende der Mikroböhrung befindlichen Böhrlochbereich ermöglicht wird.

**[0020]** Nachfolgend sind Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert. Es zeigen zum Teil stärker schematisiert:

**[0021]** Fig. 1 eine Seitenansicht einer Lasermaterialbearbeitungsanlage zum Herstellen von Mikroböhrungen,

**[0022]** Fig. 2 eine Teilaufsicht auf die in Fig. 1 gezeigte Lasermaterialbearbeitungsanlage,

**[0023]** Fig. 3 einen Längsschnitt durch ein mit einem Laserstrahl in das Werkstück eingebrachtes Böhrloch während der Glättung der Böhrlochwand mit dem Laserstrahl, wobei strichliniert auch die Bahnkurve des Fokuspunktes des Laserstrahls dargestellt ist und

**[0024]** Fig. 4 bis 7 eine grafische Darstellung einer die Form einer Schraubenlinie oder einer verallgemeinerten Schraubenlinie aufweisenden Bahnkurve des Laserstrahl-Fokuspunkts in einem kartesischen Koordinatensystem.

**[0025]** Eine im ganzen mit 1 bezeichnete Vorrichtung zum Einbringen einer Mikroböhrung 2 in ein Werkstück 3 weist einen Laser 4 zum Erzeugen eines Laserstrahls 5 auf. Der Laser 4 ist als hochrepetierender Kurzpuls-Laser mit einer

Pulswiederholrate von etwa 10 Kilohertz bei einer Pulsdauer von weniger als 20 Nanosekunden ausgebildet. Bei dem Laser handelt es sich vorzugsweise um einen Nd:YAG-Laser. Das Verfahren ist aber auch anwendbar für alle anderen Laser (z. B. solche mit kürzerer Pulsdauer und/oder kürzer Wellenlänge).

[0026] Ausgehend von dem Laser 4 zum Werkstück sind im Strahlengang des Laserstrahls 5 eine Shutter 6, ein Polarisationsmanipulator 7, eine optische Z-Achse 8, ein Galvanometer-Ablenkspiegel 9 und eine telezentrische Fokussierlinse 10 angeordnet. Mit Hilfe der Fokussierlinse 10 ist der Laserstrahl 5 im Bereich des Werkstücks 3 fokussierbar. Mittels der optischen Z-Achse 8 ist der Fokuspunkt 11 in Erstreckungsrichtung des Laserstrahls 5 relativ zu dem Werkstück 3 verstellbar. Der Galvanometer-Ablenkspiegel 9 und die telezentrische Fokussierlinse 10 ermöglichen eine Parallelverschiebung des Laserstrahls in X- und Y-Richtung. Mittels der Vorrichtung 1 lässt sich der Fokuspunkt 11 entlang einer frei definierbaren dreidimensionalen Bahnkurve 12 relativ zu dem Werkstück 3 positionieren.

[0027] Zur Ansteuerung des Ablenkspiegels 9 und der Fokussierlinse 10 ist eine Steuereinrichtung 13 vorgesehen, die mit Positionierantrieben des Ablenkspiegels 9 und der Fokussierlinse 10 in Steuerverbindung steht. In der Steuereinrichtung 13 ist die Bahnkurve für den Fokuspunkt 11 gespeichert. Das Werkstück 3 ist mittels einer Positioniereinrichtung 14 in X- und Y-Richtung relativ zu dem Laserstrahl 5 bewegbar.

[0028] In Fig. 1 ist erkennbar, dass das Werkstück 3, der Laser 4, der Shutter 6, der Ablenkspiegel 9, der Polarisationsmanipulator 7, die Fokussierlinse 10 und die Positioniereinrichtung 14 auf einem Granitblock 15 angeordnet sind, der auf einem auf dem Erdboden aufgestellten Trägergestell 16 ruht. Der Granitblock 15 ist über elastische Lager mit dem Trägergestell 16 verbunden.

[0029] Zum Herstellen der Mikrobohrung 2 wird der Laserstrahl 5 im Bereich des Werkstücks 3 fokussiert, wobei der Fokuspunkt 11 zum Abtragen von innerhalb einer zu erzeugenden Bohrlochkontur 17 befindlichem Werkstückmaterial innerhalb der Bohrlochkontur 17 umlaufend bewegt wird. Während des Materialabtrags wird der Fokuspunkt 11 gleichzeitig in der durch den Pfeil Pf markierten Durchtritts- oder Z-Richtung verschoben.

[0030] Bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 4 wird der Fokuspunkt 11 zum Herstellen einer zylindrischen Mikrobohrung entlang einer im Wesentlichen schraubenlinienförmigen Bahnkurve 12 relativ zu dem Werkstück 3 bewegt. Zu Beginn der Bearbeitung wird der Laserstrahl 5 durch Öffnen des Shutters 6 auf das Werkstück projiziert, wobei die Steuereinrichtung 13 den Ablenkspiegel 9 und die telezentrische Fokussierlinse 10 derart ansteuert, dass der Fokuspunkt 11 an der der Fokussierlinse 10 zugewandten Werkstückoberfläche 18 positioniert ist. Danach wird der Fokuspunkt 11 entlang der schraubenlinienförmigen Bahnkurve 12 in das Werkstück bewegt, bis er die gegenüberliegende rückseitige Werkstückoberfläche 19 erreicht.

[0031] Der Durchmesser des Zylinders, in dessen Mantelfläche die Bahnkurve 12 verläuft, ist etwa um den Durchmesser des Fokuspunkts 11 oder des Fokusflecks kleiner gewählt als der Durchmesser der herzustellenden Mikrobohrung 2. Während des Vorschubs des Fokuspunkts 11 wird mittels des Laserstrahls 5 innerhalb der zu erzeugenden Bohrlochkontur befindliches Werkstückmaterial von dem Werkstück 3 abgetragen. In Fig. 4 ist erkennbar, dass der Z-Abstand zueinander benachbarter Windungen der schraubenlinienförmigen Bahnkurve 12 über die gesamte Länge der Mikrobohrung 2 konstant ist. Beim Einbringen einer Mikrobohrung in einen homogenen Werkstoff wird die Ge-

schwindigkeit, mit welcher der Fokuspunkt 11 entlang der Bahnkurve 12 bewegt wird, konstant eingestellt. Zum Bearbeiten eines Gradientenmaterials kann die Bahngeschwindigkeit des Fokuspunkts 11 entlang der Bahnkurve 12 verändert werden. Es werden typische Bearbeitungszeiten von circa 20 Sekunden für ein Rundloch mit einem Durchmesser von etwa 50 Mikrometern erreicht.

[0032] Bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 5 wird der Fokuspunkt 11 zum Herstellen einer zylindrischen Mikrobohrung 2 entlang einer Bahnkurve 12 bewegt, die in einem Anfangsabschnitt der herzustellenden Mikrobohrung 2 einen ersten Bahnkurvenabschnitt 12a aufweist, der schraubenlinienförmig in der Mantelfläche eines ersten Durchmessers aufweisenden, coaxial zur Längsachse der herzustellenden Mikrobohrung 2 angeordneten ersten Zylinders verläuft. An diesen ersten Bahnkurvenabschnitt 12a schließt sich ein zweiter, etwa in einer Kegelmantelfläche verlaufender etwa spiralförmiger Bahnkurvenabschnitt 12b an, in dem sich der Durchmesser oder die Querschnittsabmessung der Bahnkurve 12 bzw. der Umlaufbewegung des Fokuspunkts 11 erweitert. In einem sich an diesen Bahnkurvenabschnitt 12b anschließenden dritten Bahnkurvenabschnitt 12c verläuft die Bahnkurve 12 schraubenlinienförmig in der Mantelfläche eines zweiten Zylinders, der zu dem ersten Zylinder konzentrisch angeordnet ist und einen größeren Durchmesser aufweist als der erste Zylinder. Der Durchmesser des zweiten Zylinders ist etwa um den Durchmesser des Fokuspunkts 11 kleiner gewählt als der Durchmesser der herzustellenden Mikrobohrung 2. Bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 5 wird also der Durchmesser der Bahnkurve 12 oder der Umlaufbewegung des Fokuspunkts 11 in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt verändert.

[0033] Bei dem in Fig. 6 gezeigten Ausführungsbeispiel zum Herstellen einer einen trichter- oder konusförmigen Bohrungsabschnitt aufweisenden Mikrobohrung 2 wird wie bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 5 in einem Anfangsabschnitt der Mikrobohrung 2 der Durchmesser der Bahnkurve 12 des Fokuspunkts 11, ausgehend von einem innerhalb der zu erzeugenden Bohrlochkontur 17 befindlichen und von dieser beanstandeten Anfangspunkt 20, zunächst vergrößert, um so den Wärmeeintrag in eine der fertigen Bohrlochwand nahe Materialzone zu minimieren. Der entsprechende Bahnkurvenabschnitt ist in Fig. 6 mit 12a bezeichnet. Dabei wird der Fokuspunkt zunächst spiralförmig in der Oberflächenebene des Werkstücks 3 bewegt und danach zusätzlich in Z-Richtung relativ zu dem Werkstück 3 verschoben.

[0034] In einem sich daran anschließenden Bohrungsabschnitt wird der Fokuspunkt 11 entlang eines sich in einer Kegelmantelfläche spiralförmig erstreckenden Bahnkurvenabschnitts 12b bewegt. Dabei nimmt der Durchmesser der Umlaufbewegung des Fokuspunkts in der durch den Pfeil Pf markierten Durchtrittsrichtung der Mikrobohrung 2 stetig ab.

[0035] In einem darauffolgenden dritten Bahnkurvenabschnitt 12c verläuft die Bahnkurve 12 schraubenlinienförmig in der Mantelfläche eines zu der Kegelmantelfläche des zweiten Bahnkurvenabschnitts coaxialen Zylinders. Nach dem Durchlaufen dieser Zylindermantelfläche wird der Fokuspunkt 11 spiralförmig zur Achse des Zylinders bewegt, wo der Laserstrahl 5 an einem Endpunkt 21 abgeschaltet wird.

[0036] Bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 7 wird eine Mikrobohrung mit einem Freiformquerschnitt hergestellt. Dabei wird die Durchtrittsrichtung der zu erzeugenden Mikrobohrung 2 weisende Geschwindigkeitskomponente der Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt 11 und Werkstück 3 in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt

verändert. In Fig. 7 ist deutlich erkennbar, dass zueinander benachbarte Windungen der Bahnkurve 12 in einem Anfangs- und einem Endabschnitt der zu erzeugenden Mikrobohrung 2 in Durchtrittsrichtung Pf jeweils einen kleineren Abstand aufweisen, als in einem dazwischen befindlichen Abschnitt der Mikrobohrung 2. Wie bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 6 verläuft der Anfangsbereich der Bahnkurve 12, ausgehend von einem Anfangspunkt 20 spiralförmig nach außen, während der Endbereich der Bahnkurve 12 spiralförmig nach innen zu einem Endpunkt 21 verläuft.

[0037] Die Herstellung der Mikrobohrung 2 erfolgt vorzugsweise in zwei Bearbeitungsschritten, wobei in einem ersten Bearbeitungsschritt eine Schruppbearbeitung durchgeführt wird, bei der die zu erzeugende Kontur der Mikrobohrung 2 im wesentlichen hergestellt wird. Dabei wird die Bearbeitungsgeschwindigkeit auf maximalen Vorschub ausgelegt. In einem zweiten Bearbeitungsschritt wird eine Schlichtbearbeitung durchgeführt, bei der die Innenwand der Mikrobohrung 2 geglättet wird. Bei dem Schlichtbearbeitungsschritt beträgt die Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt 11 und Werkstück 3 das fünf bis zehnfache der Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt 11 und Werkstück 3 in dem Schruppbearbeitungsschritt. In dem Schlichtbearbeitungsschritt wird die Bahnkurve 12 in entgegengesetzter Richtung durchlaufen wie in dem Schruppbearbeitungsschritt.

[0038] Mittels des Polarisationsmanipulators 12 kann die Lage der Polarisationssebene des Laserstrahls 5 relativ zu dem Werkstück 3 entlang der Bahnkurve 12 des Fokuspunkts 11 jeweils etwa rechtwinklig zur Tangente an die Bahnkurve 12 in der jeweiligen Bearbeitungsstelle orientiert werden, um eine gute Energieeinkopplung in das Werkstück 3 zu erreichen.

[0039] Bei dem Verfahren zum Herstellen einer Mikrobohrung wird ein Laserstrahl im Bereich eines Werkstücks fokussiert. Zum Abtragen von innerhalb einer zu erzeugenden Bohrlochkontur befindlichem Werkstückmaterial werden der Fokuspunkt relativ zueinander bewegt. Dabei läuft der Fokuspunkt innerhalb der Bohrlochkontur oder deren gerader Verlängerung um, wobei er zusätzlich in und/oder entgegen der Durchtrittsrichtung der zu erzeugenden Mikrobohrung relativ zu dem Werkstück bewegt wird.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen einer Mikrobohrung (2), wobei ein Laserstrahl (5) im Bereich eines Werkstücks (3) fokussiert und der Fokuspunkt (11) zum Abtragen von innerhalb einer zu erzeugenden Bohrlochkontur (17) befindlichem Werkstückmaterial innerhalb der Bohrlochkontur (17) oder deren gerader Verlängerung umlaufend bewegt wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Fokuspunkt (11) und das Werkstück (3) während des Materialabtrags zusätzlich zu der Umlaufbewegung in und/oder entgegen der Durchtrittsrichtung (Pf) der zu erzeugenden Mikrobohrung (2) relativ zueinander bewegt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Fokuspunkt (11) während des Materialabtrags entlang einer schraubenlinienförmigen Bahnkurve (12) bewegt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die in Durchtrittsrichtung (Pf) der zu erzeugenden Mikrobohrung (2) weisende Geschwindigkeitskomponente der Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt (11) und Werkstück (3) zumindest in einem Abschnitt der zu erzeugenden Mikrobohrung (2) konstant gehalten wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die in Durchtrittsrichtung (Pf) der zu erzeugenden Mikrobohrung weisende Geschwindigkeitskomponente der Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt (11) und Werkstück (3) in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt verändert wird und insbesondere in einem Anfangs- und/oder Endabschnitt der zu erzeugenden Mikrobohrung (2) kleiner gewählt wird als in einem dazwischen befindlichen Abschnitt der Mikrobohrung (2).

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Durchmesser oder wenigstens eine Querschnittsabmessung der Umlaufbewegung des Fokuspunkts (11) in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt verändert wird und dass vorzugsweise in einem Anfangsabschnitt der Mikrobohrung (2) der Durchmesser oder die wenigstens eine Querschnittsabmessung kleiner gewählt wird als in einem sich an den Anfangsabschnitt anschließenden Abschnitt der Mikrobohrung (2).

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Durchmesser oder wenigstens eine Querschnittsabmessung der Umlaufbewegung des Fokuspunkts (11) in einem vorzugsweise am Anfang der zu erzeugenden Mikrobohrung (2) angeordneten Bohrlochabschnitt mit zunehmendem Bohrfortschritt reduziert wird, vorzugsweise derart, dass die Bahnkurve (12) entlang welcher der Fokuspunkt (11) bewegt wird, in einer trichter- oder konusförmigen Fläche verläuft.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass in einem Schrupp-Bearbeitungsschritt die zu erzeugende Bohrlochkontur (17) im wesentlichen hergestellt wird, dass danach in einem Schlicht-Bearbeitungsschritt die Innenwand der Mikrobohrung (17) geglättet wird, und dass in dem Schlicht-Bearbeitungsschritt die Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt (11) und Werkstück (3) vorzugsweise größer gewählt wird als in dem Schrupp-Bearbeitungsschritt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass in dem Schlicht-Bearbeitungsschritt der Drehsinn der Umlaufbewegung des Fokuspunkts (11) entgegengesetzt zum Drehsinn der Umlaufbewegung bei dem Schrupp-Bearbeitungsschritt gewählt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Fokuspunkt (11) zu Beginn der Bearbeitung innerhalb der zu erzeugenden Bohrlochkontur (17) oder deren gerader Verlängerung mit seitlichem Abstand dazu vorzugsweise etwa mittig zu der zu erzeugenden Mikrobohrung (2) positioniert wird, bis Material von dem Werkstück (3) abgetragen wird, dass danach der seitliche Abstand zwischen der Bohrlochkontur (17) oder deren gerader Verlängerung durch eine Relativbewegung zwischen Fokuspunkt (11) und Werkstück (3) reduziert wird und dass dann die zu erzeugende Bohrlochkontur (17) im wesentlichen hergestellt wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl (5) zum Erzeugen der Umlaufbewegung des Fokuspunkts (11) quer zu seiner Längserstreckung parallel verschoben wird und dabei vorzugsweise rechtwinklig zur strahleinfallsseitigen Oberfläche des Werkstücks (3) auf dieses auftrifft.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass zum Herstellen der Mikro-

bohrung (2) wenigstens zwei seitlich aneinander angrenzende oder sich seitlich bereichsweise überdeckende Teilbohrlöcher in das Werkstück (3) eingebracht werden, und dass dazu jeweils der Fokuspunkt (11) innerhalb der Bohrlochkontur des betreffenden, zu erzeugenden Teilbohrlochs oder dessen gerader Verlängerung umlaufend und zusätzlich in und/oder entgegen der Durchtrittsrichtung (Pf) des zu erzeugenden Teilbohrlochs relativ zueinander bewegt werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlleistung des Laserstrahls (5) in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt verändert wird und dass vorzugsweise in einem Anfangs- und/oder Endabschnitt der zu erzeugenden Mikrobohrung (2) eine größere Strahlleistung gewählt wird als in einem dazwischen befindlichen Abschnitt der Mikrobohrung (2).

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl (5) im wesentlichen in einer Ebene polarisiert ist, und dass die Lage dieser Polarisationssebene relativ zu dem Werkstück (3) entlang der Bahnkurve (12) des Fokuspunkts verändert wird, vorzugsweise derart, dass die Polarisationssebene jeweils etwa rechtwinklig zur Tangente an die Bahnkurve (12) in der jeweiligen Bearbeitungsstelle verläuft.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass im Bereich der zu erzeugenden Mikrobohrung (2) während des Materialabtrags von dem Werkstück (3) ein Hilfgasstrom vorzugsweise quer zur Durchtrittsrichtung (Pf) der zu erzeugenden Mikrobohrung (2) zugeführt wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass während des Materialabtrags an der der Strahleinkoppelseite gegenüberliegenden Rückseite des Werkstücks (3) ein Unterdruck angelegt wird.

---

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

---

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

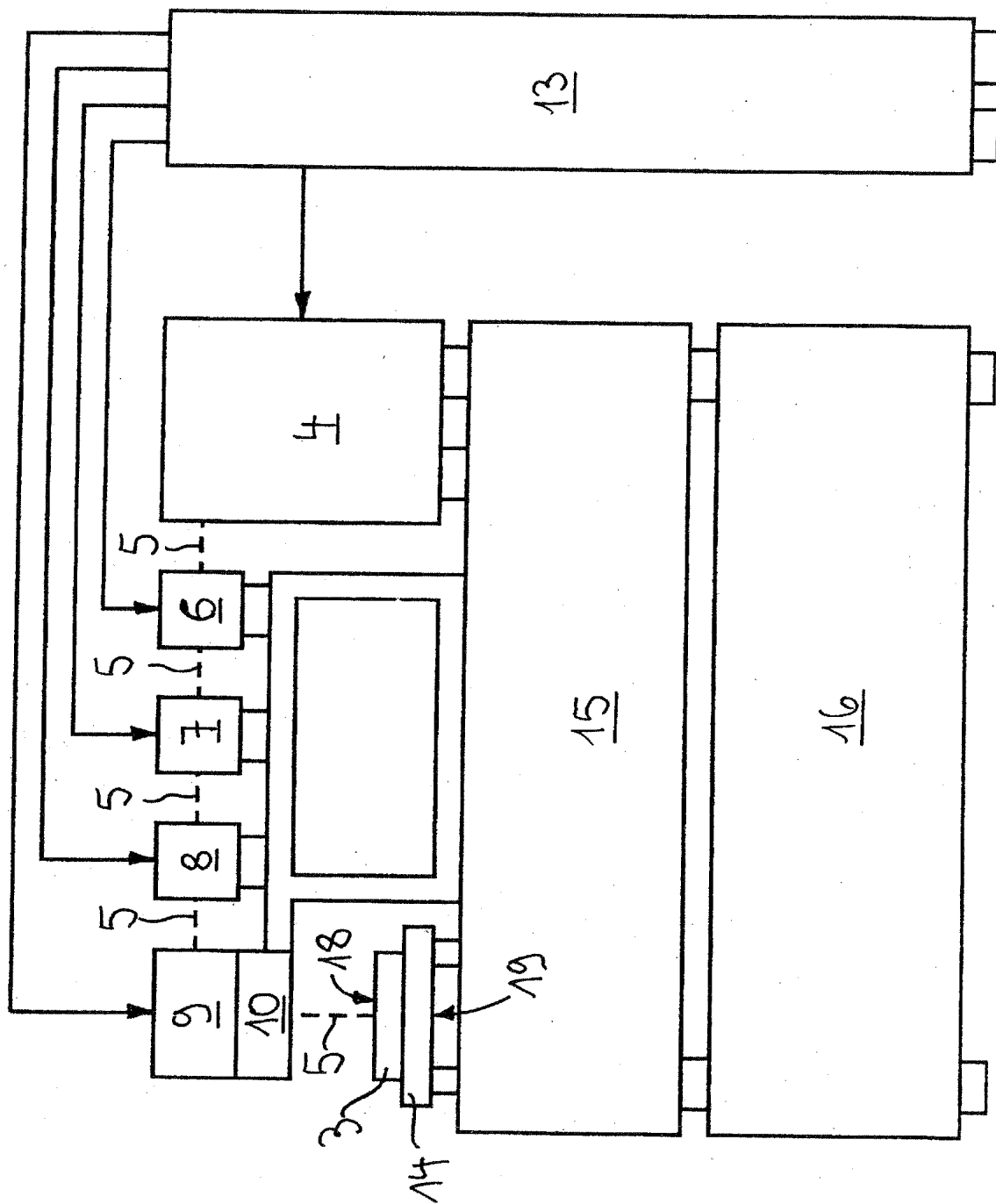


Fig. 1



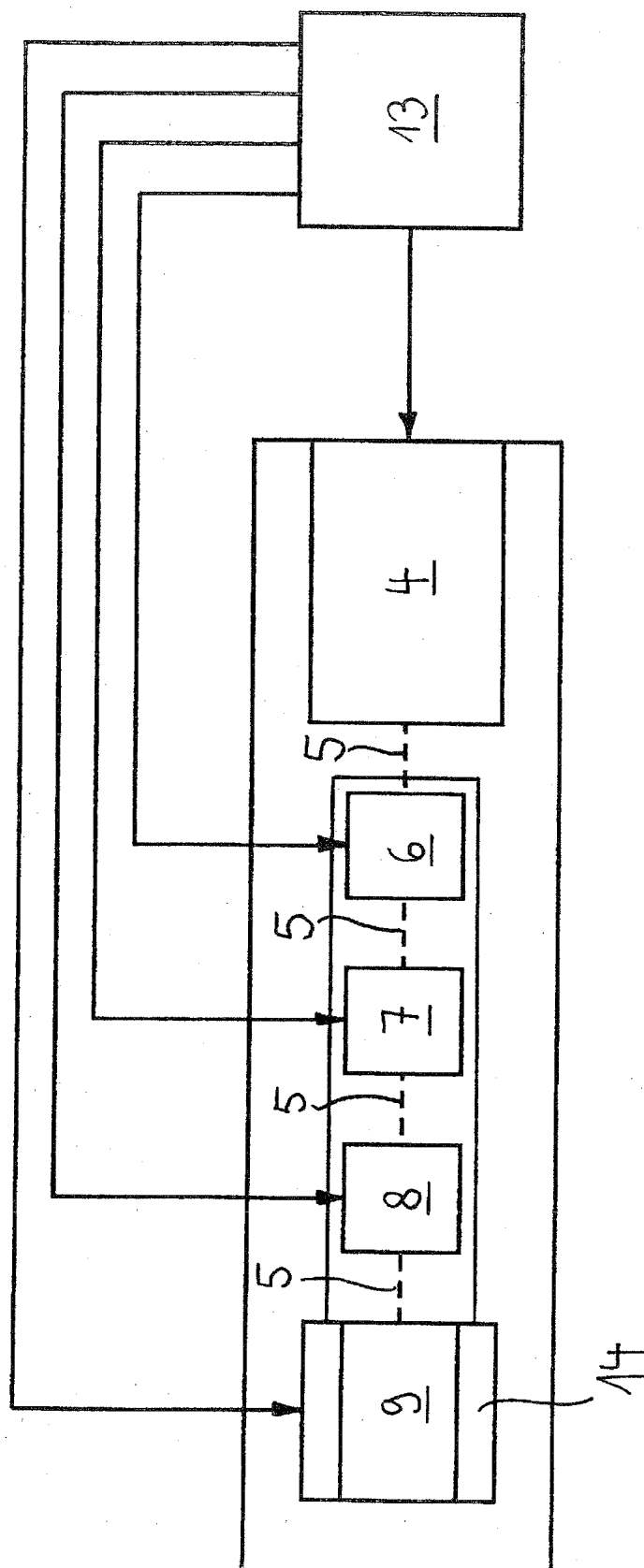


Fig. 2

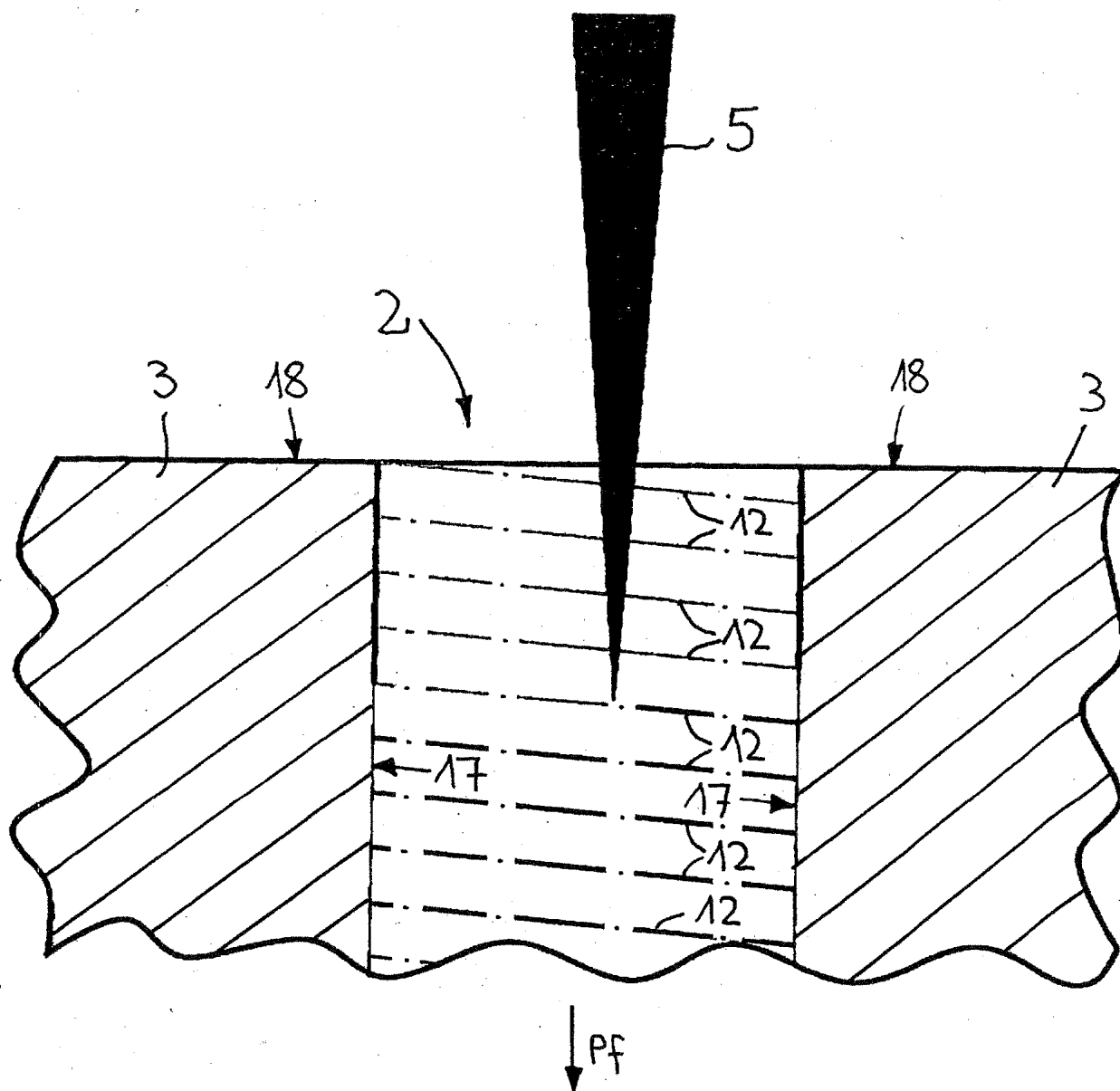


Fig. 3

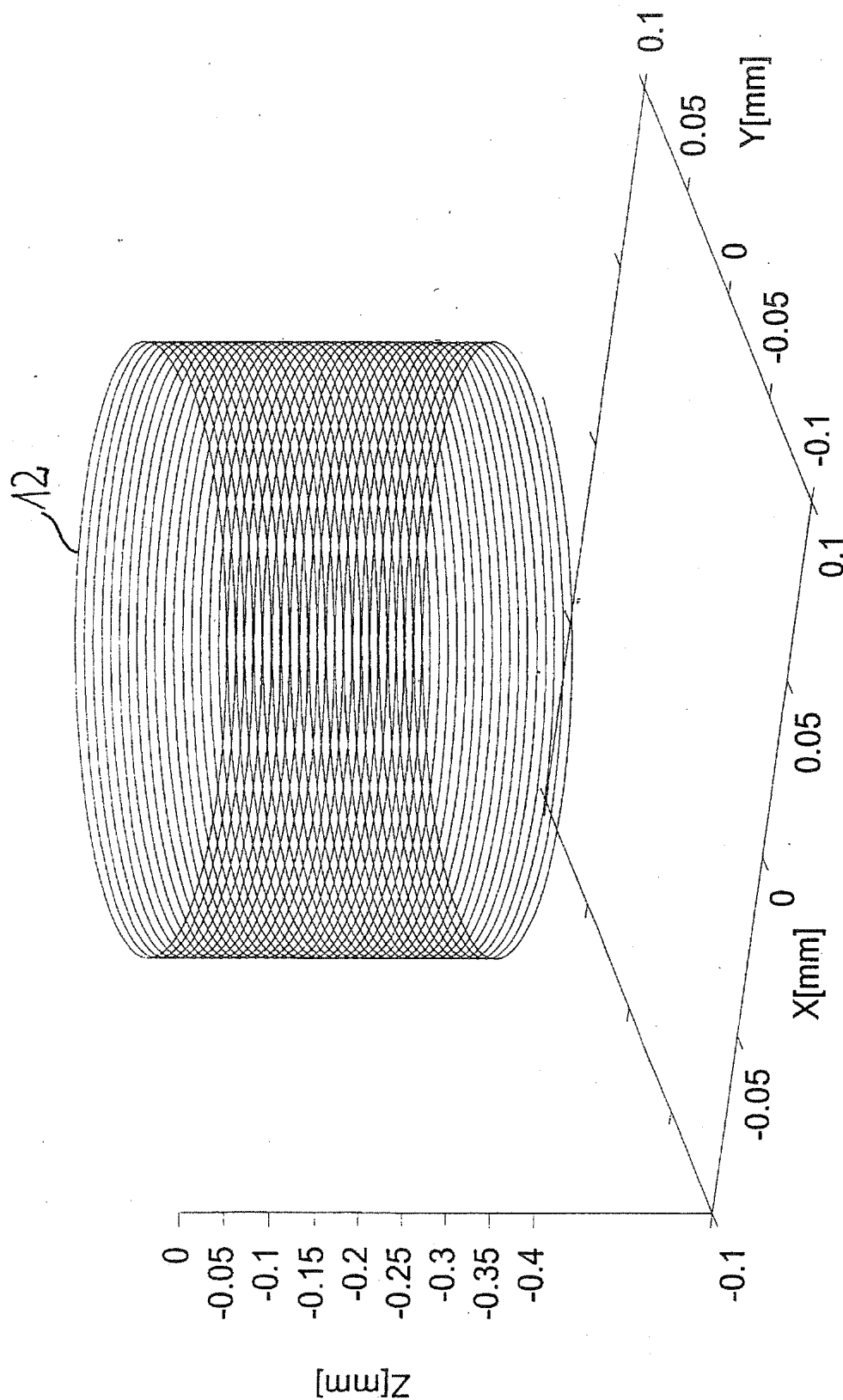


Fig. 4

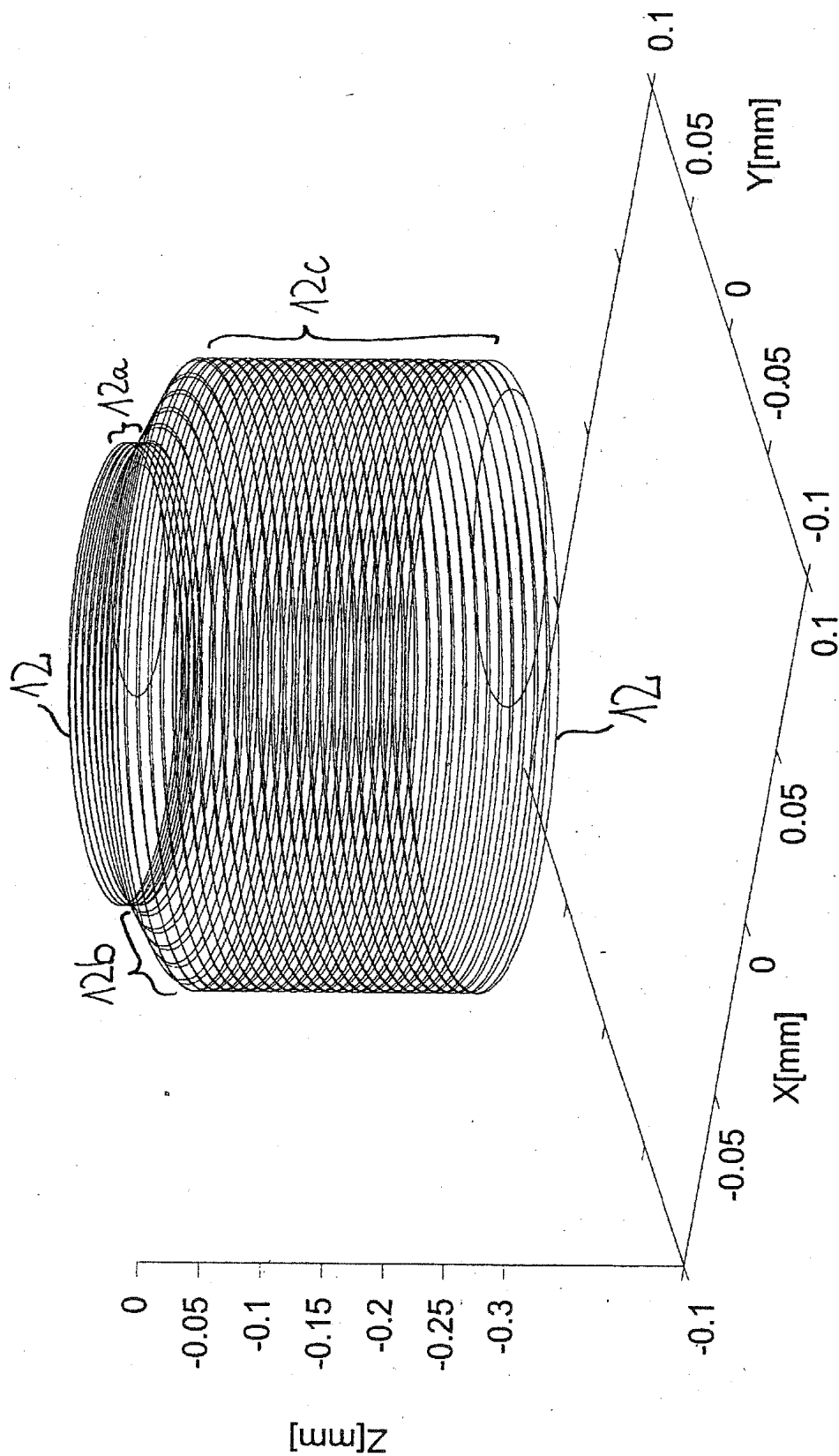


Fig. 5

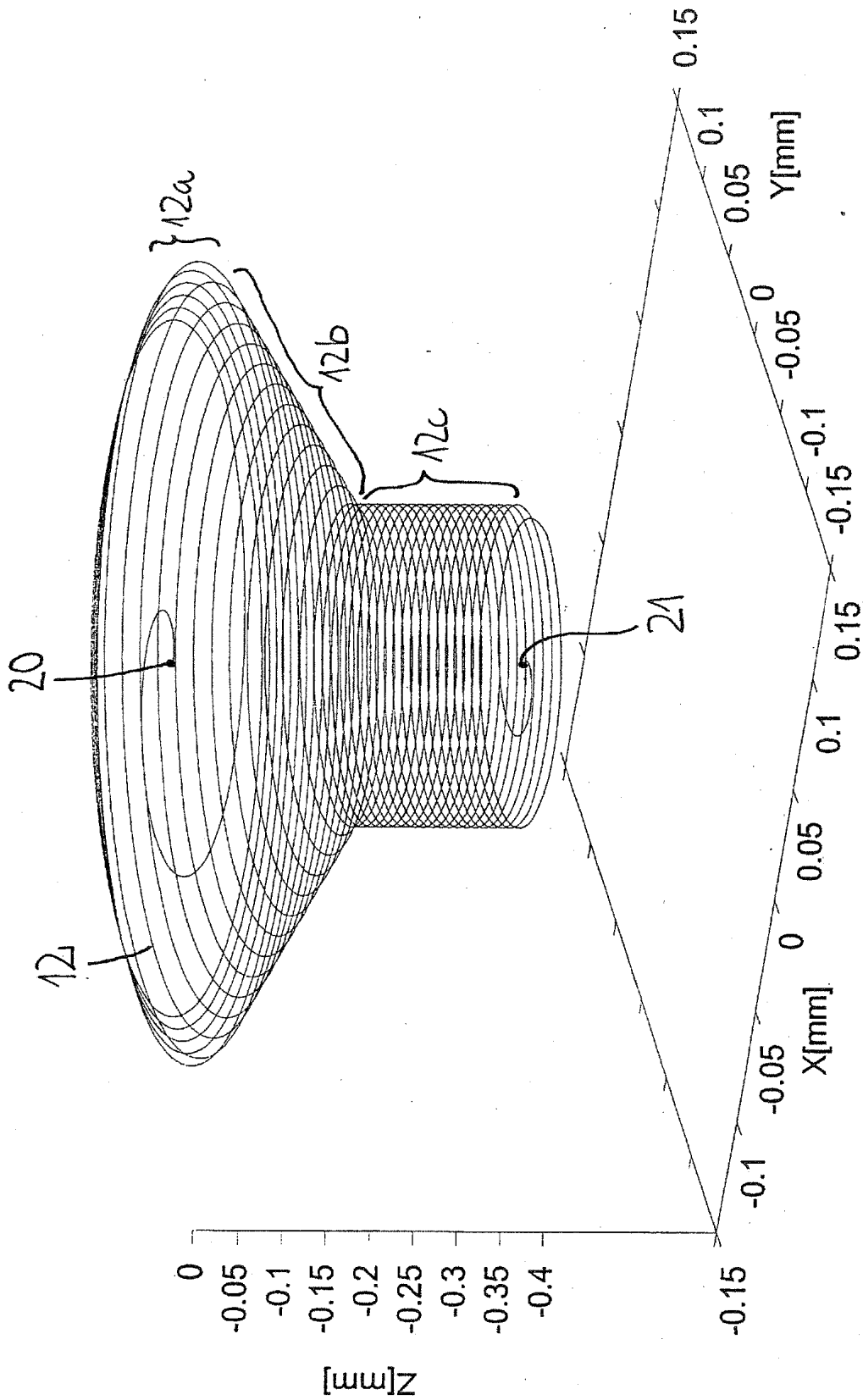


Fig. 6

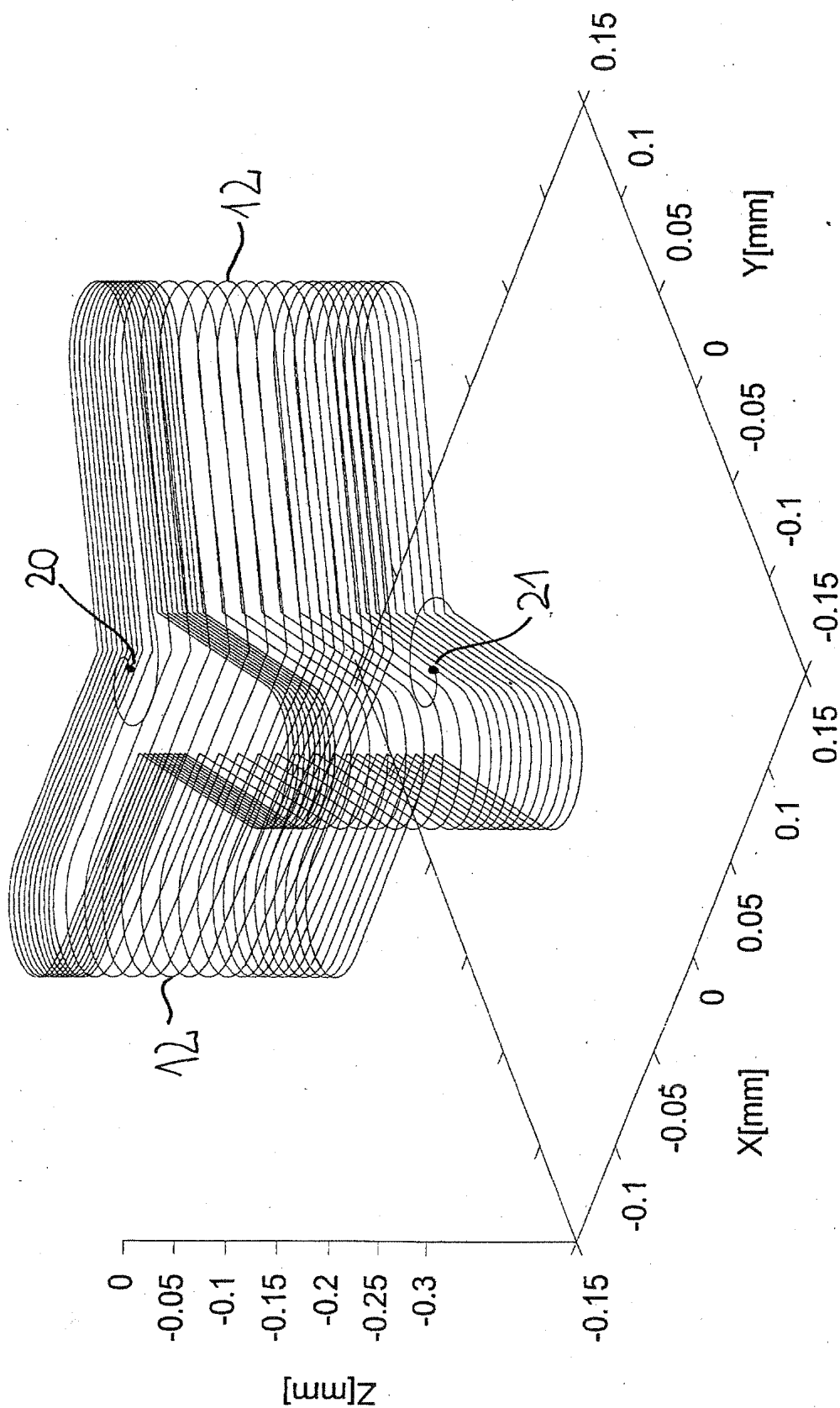


Fig. 7